



Crises sanitaires en agriculture

Les espèces invasives
sous surveillance



Crises sanitaires en agriculture

Les espèces invasives
sous surveillance

C. Lannou, J.-Y. Rasplus, S. Soubeyrand,
M. Gautier, J.-P. Rossi, coord.

Collection *Savoir-faire*

Les agricultures urbaines en France

Comprendre les dynamiques, accompagner les acteurs

C. Aubry, G. Giacchè, F. Maxime, C.-T. Soulard, coord.

2022, 224 p.

Life cycle assessment of agri-food system

An operational guide dedicated to developing and emerging economies

C. Basset-Mens, A. Avadi, C. Bessou, I. Acosta-Alba, Y. Briard, S. Payen, coord.

2022, 210 p.

Spillways on river levees

G. Degoutte, R. Tourment, coord.

2021, 176 p.

L'immunité des plantes

Pour des cultures résistantes aux maladies

C. Lannou, D. Roby, V. Ravigné, M. Hannachi, B. Moury, coord.

2021, 392 p.

Cet ouvrage a bénéficié du soutien financier d'INRAE.

Pour citer cet ouvrage :

Lannou C., Rasplus J.-Y., Soubeyrand S., Gautier M., Rossi J.-P., coord., 2023.
Crises sanitaires en agriculture. Les espèces invasives sous surveillance, éditions Quæ,
Versailles, 326 p.

Éditions Quæ

RD 10, 78026 Versailles Cedex

www.quae.com – www.quae-open.com

© Éditions Quæ, 2023

ISBN papier : 978-2-7592-3482-0

ISBN pdf : 978-2-7592-3483-7

ISBN ePub : 978-2-7592-3484-4

ISSN : 1952-1251

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction même partielle du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Sommaire

Introduction : la vulnérabilité de l'agriculture face aux crises sanitaires	9
<i>Christian Lannou</i>	
Émergences, invasions et crises sanitaires.....	10
La fabrique des émergences.....	11
Un système d'assurance qui ne tient plus.....	14
Réduire la vulnérabilité sanitaire des territoires agricoles.....	16
S'organiser face aux crises sanitaires.....	17
Références bibliographiques.....	20

Partie 1 Biologie de l'invasion

1. L'anthropocène : l'ère des invasions biologiques et des crises phytosanitaires ...25	
<i>Jean-Claude Streito et Guillaume Fried</i>	
Les différentes étapes du processus d'invasion.....	26
Pourquoi certaines populations deviennent-elles invasives?.....	29
Conséquences sur les patrons d'invasion et leur évolution.....	34
Conclusion.....	36
Références bibliographiques.....	37
2. Reconstruire les routes d'invasion biologique par des approches de génétique des populations39	
<i>Arnaud Estoup et Éric Lombaert</i>	
Reconstruire les routes d'invasion pour aborder des questions appliquées et académiques.....	40
Des méthodes de reconstruction des routes d'invasion de plus en plus performantes.....	41
Illustrations au travers de l'étude de deux envahisseurs emblématiques.....	43
Que nous apprennent les routes d'invasion?.....	47
Limites et perspectives.....	48
Conclusion.....	50
Références bibliographiques.....	51
3. Invasions et processus évolutifs55	
<i>Benoit Facon, Ruth A. Hufbauer et Julien Foucaud</i>	
Le processus d'introduction : un facteur-clé du devenir évolutif des populations envahissantes.....	56
Invasions et changements adaptatifs : où, quand et comment?.....	61

De l'étude de cas particuliers à la formalisation de scénarios d'invasion.....	65
Conclusion.....	67
Références bibliographiques.....	68
4. Climat et invasions biologiques.....	71
<i>Jean-Pierre Rossi</i>	
Qu'est-ce que le climat?.....	71
Le changement climatique.....	73
Climat et aires de distributions potentielles.....	74
Conclusion.....	77
Références bibliographiques.....	77
5. Les scolytes du genre <i>Xylosandrus</i> à la conquête de l'Europe.....	79
<i>Teddy Urvois, Jean-Pierre Rossi, Charles Perrier, Alain Roques, Marie-Anne Auger-Rozenberg et Carole Kerdelhué</i>	
Biologie des Xyleborini et risques d'invasion.....	80
Estimer l'aire de distribution potentielle sur la base des occurrences actuelles.....	82
Déterminer l'origine des populations invasives à l'aide de marqueurs moléculaires.....	85
Conclusion.....	92
Références bibliographiques.....	94

Partie 2 Détecter l'arrivée des envahisseurs et anticiper les prochains

6. Importance de la systématique pour anticiper et gérer les crises sanitaires.....	99
<i>Jean-Yves Rasplus, Raphaëlle Mouttet et Astrid Cruaud</i>	
La taxonomie, science hypothético-déductive.....	100
La taxonomie, le parent pauvre des sciences de la vie.....	101
Les outils moléculaires de détection et d'identification et leur nécessaire validation par des taxonomistes.....	102
Les taxonomistes doivent maîtriser les outils moléculaires et morphologiques de dernière génération.....	104
La surveillance future nécessite que la systématique ait un futur.....	105
Conclusion.....	107
Références bibliographiques.....	108
7. Séquençage à haut débit pour la surveillance du territoire en santé des plantes.....	111
<i>Astrid Cruaud et Jean-Yves Rasplus</i>	
De quels outils disposons-nous traditionnellement pour la surveillance du territoire?.....	112
Que sont les technologies de séquençage à haut débit?.....	114
Traitement bio-informatique des données et contrôles qualité.....	119

Les technologies de séquençage à haut débit : de la recherche à la surveillance du territoire.....	120
Conclusion.....	121
Références bibliographiques.....	122
8. Utilisation d'approches phylogénétiques pour mieux comprendre et prédire le potentiel invasif des espèces	125
<i>Gael J. Kergoat, Christine N. Meynard, Guillaume Fried et Emmanuelle Jousset</i>	
Vers une meilleure prise en compte de la diversité intraspécifique dans la prédiction du risque d'invasion.....	126
Reconstruire l'histoire des espèces et de leurs caractéristiques biologiques pour prédire les invasions.....	128
Intégration des phylogénies pour l'étude du potentiel invasif à l'échelle des communautés.....	130
Conclusion.....	133
Références bibliographiques.....	133
9. Anticiper les invasions et les détecter précocement	137
<i>Alain Roques et Marie-Anne Auger-Rozenberg</i>	
Une détection très problématique des nouvelles arrivées.....	138
Les plantations sentinelles comme outil d'identification des envahisseurs potentiels.....	139
Le piégeage avec des attractifs à vocation générique pour une détection précoce des espèces envahissantes.....	144
Conclusion.....	147
Références bibliographiques.....	148
10. Les citoyens, sentinelles de la surveillance phytosanitaire?	151
<i>Jean-Claude Streito, Julien Papaix, Marguerite Chartois, Christophe Botella, Éric Pierre, Jean-Marc Armand, Jonathan Gaudin et Jean-Pierre Rossi</i>	
Utilisation des sciences participatives pour la surveillance des espèces exotiques envahissantes.....	152
Sciences participatives : des moyens humains et d'analyse importants.....	156
Spécificité de l'analyse des données.....	158
Limites et perspectives des sciences participatives.....	160
Conclusion.....	161
Références bibliographiques.....	161

Partie 3

Surveiller, analyser et anticiper

11. Les invasions biologiques à la lumière des modèles	167
<i>Lionel Roques et Samuel Soubeyrand</i>	
Propagation spatiale.....	167
Effet Allee et événements d'introduction.....	172

Modèles épidémiques de type SIR.....	174
Invasions adaptatives.....	177
Conclusion.....	181
Références bibliographiques.....	182
12. Surveillance à l'échelle des territoires.....	187
<i>Sylvain Poggi, Gaël Thébaud, Leyli Borner et Davide Martinetti</i>	
Surveiller pour prévenir l'introduction d'une espèce invasive dans un territoire.....	188
Surveiller pour prévoir et limiter l'expansion d'une espèce envahissante.....	191
Conclusion.....	199
Références bibliographiques.....	199
13. Des sentinelles sur les autoroutes aériennes d'agents phytopathogènes.....	203
<i>Cindy E. Morris et Davide Martinetti</i>	
Une histoire déjà longue.....	204
Mécanismes impliqués dans la dissémination aérienne à longue distance.....	205
Modélisation de la DALD des agents phytopathogènes aéroportés.....	208
Surveillance des agents phytopathogènes fondée sur les trajectoires probables de dissémination aérienne.....	211
Conclusion.....	212
Références bibliographiques.....	214
14. Décrypter l'émergence de <i>Xylella fastidiosa</i> en Europe et surveiller son expansion.....	219
<i>Marie-Agnès Jacques, Samuel Soubeyrand et Enora Dupas</i>	
Comment une faiblesse biologique peut être une force épidémiologique.....	219
<i>Xylella fastidiosa</i> : une espèce génétiquement diverse et une gamme d'hôtes démesurément grande.....	220
Une origine américaine pour <i>Xylella fastidiosa</i>	221
Agrandissement de l'aire de distribution <i>via</i> des introductions multiples.....	223
Réglementation européenne et mesures de surveillance.....	225
Évaluation du risque d'expansion de <i>Xylella fastidiosa</i> en Europe.....	227
Impact économique des maladies dues à <i>Xylella fastidiosa</i>	229
Conclusion.....	230
Références bibliographiques.....	230

Partie 4

S'organiser contre les crises sanitaires

15. L'économie des invasions biologiques : vers une hiérarchisation des stratégies de gestion.....	237
<i>Pierre Courtois, Charles Figuières, César Martínez, Gaël Thébaud et Alban Thomas</i>	
Les coûts des invasions et des stratégies de gestion.....	238
Analyses coût-bénéfice et coût-efficacité.....	239
Quatre principaux arbitrages.....	240

Des outils de décision pour hiérarchiser les choix de gestion	242
Les enjeux de la gestion privée : inefficacité et coordination	247
Conclusion	249
Références bibliographiques	249
16. Un cadre réglementaire pour commercer librement tout en maîtrisant les introductions d'envahisseurs	251
<i>David Caffier</i>	
Un cadre réglementaire international pour limiter les risques d'introduction d'envahisseurs	252
Organismes nuisibles, végétaux et autres produits à réglementer	254
Les principales mesures en place pour lutter contre les foyers d'organismes réglementés	258
D'autres réglementations pour maîtriser les invasions biologiques	262
Conclusion	264
Références bibliographiques	264
17. La surveillance active des menaces phytosanitaires émergentes : le défi de la mise en œuvre opérationnelle	267
<i>Lucie Michel, Marie Grosdidier, Ismaël Houillon et Virginie Ravigné</i>	
Définir les menaces	270
Définir une stratégie d'échantillonnage	271
Mettre en place une organisation efficace	275
Gérer et exploiter les données	277
Conclusion	279
Références bibliographiques	280
18. La prophylaxie pour gérer les crises sanitaires lorsqu'elles s'installent : vivre avec la flavescence dorée de la vigne	283
<i>Sylvie Malembic-Maher, Xavier Foissac, Fiona Panziera et Marc Barbier</i>	
Émergence et installation de la flavescence dorée en Europe	284
Panorama sur la gestion de la flavescence dorée à l'échelle européenne	287
Fortes spécificités régionales des dispositifs d'épidémiosurveillance de la flavescence dorée en France	289
Approches d'expérimentations collectives et multidisciplinaires pour le « vivre avec »	292
De la gestion collective à la fabrique du consensus	295
Conclusion	296
Références bibliographiques	296
19. Collaboration internationale contre les crises phytosanitaires : de la recherche aux normes	299
<i>Baldissera Giovani, Sarah Brunel, Roger Day, Françoise Petter et Muriel Suffert</i>	
La coordination des activités de recherche en appui à la réglementation et aux activités de terrain	300

Renforcer les systèmes d'alerte et d'intervention contre les organismes nuisibles.....	302
Vers un réseau de laboratoires de diagnostic pour appuyer les pays dans l'identification des organismes nuisibles.....	304
Développer les compétences nationales par des collaborations internationales.....	305
Conclusion.....	307
Références bibliographiques.....	308
Conclusion générale	309
Glossaire	313
Liste des auteurs	323

Introduction :

la vulnérabilité de l'agriculture face aux crises sanitaires

Christian Lannou

Ce livre trouve son origine dans une démarche d'INRAE pour structurer une réponse de la recherche académique aux crises sanitaires causées par les agents pathogènes et les organismes ravageurs des cultures. On parle souvent du « temps long de la recherche » pour dire qu'il faut des années avant qu'une idée trouve une application pratique. Cela correspond à une réalité : l'approche ASIRPA (Joly *et al.*, 2015) montre qu'il faut environ vingt ans entre la première action de recherche et la production de l'innovation. Pourtant, cela est aussi une erreur de perception, car répondre à un problème pratique ne consiste pas à partir de zéro mais plutôt à mobiliser les connaissances déjà disponibles, en général nombreuses, et à réaliser un effort d'adaptation à la situation nouvelle. Il s'agit là d'un travail différent, associant recherche, ingénierie et organisation, qui peut se faire sur un temps court, compatible avec le besoin d'une réponse rapide. Cette démarche a été mise en œuvre lors de la crise causée en 2015 en France par la bactérie *Xylella fastidiosa* et a permis à la fois d'apporter des réponses pratiques, de progresser sur notre organisation face aux crises sanitaires et même de construire une nouvelle structure dédiée à l'épidémiosurveillance. Tout cela est évoqué dans différents chapitres de l'ouvrage, mais au-delà de cet exemple, nous avons souhaité faire état des connaissances disponibles sur le sujet des invasions biologiques en agriculture et des crises sanitaires qui en découlent, et montrer l'effort continu de la recherche pour les faire progresser davantage.

La première partie du livre traite de la biologie de l'invasion, en montrant des aspects théoriques et des illustrations. La deuxième est consacrée aux approches et aux outils développés pour identifier et surveiller les organismes responsables des crises sanitaires ou susceptibles d'en causer un jour. La troisième partie présente les méthodes de surveillance du territoire et de suivi des émergences et des invasions biologiques. La dernière examine l'organisation des services régaliens, de la recherche et des filières agricoles pour faire face à une crise sanitaire. Mais avant d'entrer dans le cœur du propos et d'explorer de manière détaillée ces différents

sujets, il est sans doute utile de faire quelques rappels et notamment d'expliquer pourquoi l'agriculture est si vulnérable face aux épidémies et aux proliférations de ravageurs des plantes.

Émergences, invasions et crises sanitaires

Depuis son origine, l'agriculture a été confrontée aux agents pathogènes et aux ravageurs des végétaux cultivés. Ces organismes de nature très diverse (virus, bactéries, champignons, nématodes, arthropodes, plantes parasites...) auxquels s'ajoutent les plantes adventices (plantes sauvages en compétition avec les plantes cultivées, autrefois qualifiées de « mauvaises herbes »), et que nous rassemblons par la suite sous le terme de *bioagresseurs*, diminuent le rendement agricole de manière plus ou moins importante et peuvent aller jusqu'à détruire complètement une culture. Chaque espèce cultivée est soumise à un cortège de bioagresseurs qui varie selon les régions et les climats, en général composé de quelques espèces majeures et d'un ensemble d'organismes de moindre incidence. Le blé, par exemple, est majoritairement attaqué en Europe par trois champignons, causant la septoriose (*Mycosphaerella graminicola*) et deux formes de rouilles (*Puccinia triticina* et *Puccinia striiformis*), mais aussi par l'oïdium (*Blumeria graminis*) et par des champignons affectant l'épi et causant une fusariose (dont *Fusarium graminearum* et d'autres espèces). Tous ces organismes sont susceptibles d'entraîner des épidémies sévères. S'y ajoute dans des régions plus chaudes *Puccinia graminis*, redoutable agent de la rouille noire. De manière moins fréquente, le blé peut développer d'autres pathologies fongiques comme l'ergot, la carie, le piétin... Cette liste ne s'arrête pas là et inclut également plusieurs virus, quelques insectes et bon nombre de plantes adventices. La grande majorité de ces bioagresseurs sont endémiques, bien connus des agriculteurs et en général bien maîtrisés par l'emploi de produits phytosanitaires (chimiques ou biologiques), par l'utilisation de variétés résistantes ou toute action de protection des cultures. Il arrive cependant que de nouveaux bioagresseurs apparaissent, soit par introduction depuis une région éloignée dans laquelle ils sont déjà actifs et bien connus, soit sous une forme nouvelle ou qui n'avait jamais été identifiée comme problématique – on parle alors d'émergence.

Les introductions d'organismes biologiques sont souvent liées aux activités humaines impliquant un transport de matériel. Les exemples sont variés et le nombre d'introductions est en forte augmentation depuis le milieu du xx^e siècle en raison de la facilitation des échanges à l'échelle mondiale (chapitre 1). On peut citer l'arrivée à Marseille du champignon causant le chancre coloré du platane *via* des caisses en bois apportées par l'armée américaine lors de la Seconde Guerre mondiale, l'introduction du frelon asiatique dans le Lot-et-Garonne avec des poteries importées de Chine ou celle du phylloxéra de la vigne en France par des plans contaminés en provenance d'Amérique. Certains agents pathogènes voyagent aussi par eux-mêmes, portés par les vents, et c'est ainsi que la rouille du caféier a conquis le monde depuis son pays d'origine, l'Éthiopie. Lorsque l'espèce

introduite réussit à s'établir, ce qui n'est pas toujours le cas, on parle d'invasion biologique (chapitres 2 à 5). Dans le cas général, une invasion biologique perturbe l'écosystème local et entraîne une compétition entre espèces autochtones et espèce envahissante. Les exemples sont multiples, tel celui de l'écureuil gris, arrivé d'Amérique, qui remplace l'écureuil roux en Grande-Bretagne. Dans le contexte particulier de l'agriculture, c'est un bioagresseur exotique qui se développe dans une nouvelle région, avec des conséquences plus ou moins dommageables. Dans les cas les plus graves, on parlera de crise sanitaire, avec des pertes de production qui peuvent être considérables.

Les émergences conduisent au même résultat, l'apparition d'un nouveau bioagresseur sur une culture et dans une région données, mais trouvent souvent leur origine dans des mécanismes biologiques permettant l'adaptation à un nouvel hôte, voire la formation d'une nouvelle espèce pathogène. C'est ainsi que dans les années 1980, au Brésil, une espèce de champignon pathogène du riz (*Pyricularia oryzae*) a produit une forme nouvelle attaquant le blé et a causé des dégâts considérables dans plusieurs régions du monde (Islam *et al.*, 2020). De même, dans les années 1990, un nouvel agent pathogène est apparu sur l'aune, suite à un phénomène d'hybridation entre deux espèces peu pathogènes de *Phytophthora alni* (Husson *et al.*, 2015). Il arrive aussi que des espèces auparavant considérées comme non envahissantes ou comme inoffensives dans leur région d'origine se révèlent invasives après une introduction dans une autre région (chapitre 9).

La fabrique des émergences

La notion de crise sanitaire est bien connue du grand public depuis l'année 2020 avec l'apparition puis la diffusion à l'échelle mondiale d'un nouveau virus pathogène sur l'espèce humaine, le SARS-CoV-2. Le phénomène n'est pourtant pas nouveau (on peut penser à la grippe espagnole ou à la peste au ^{xiv}^e siècle en Europe), mais les grandes épidémies qui étaient vécues autrefois comme des fatalités sont désormais des crises qu'il faut gérer puisque le niveau des connaissances scientifiques et d'organisation des sociétés le permet. De plus, la fréquence de ces épidémies généralisées, ou pandémies, semble croissante en raison notamment de l'augmentation des déplacements et des échanges à longue distance et à cause de la fragmentation des espaces naturels conduisant à l'accroissement de la surface de contact entre l'homme et des réservoirs potentiels d'agents pathogènes (Robin, 2021).

Dans le domaine agricole également, le risque sanitaire a toujours existé. On trouve des références aux maladies des cultures, notamment les rouilles des céréales, dès l'Antiquité grecque et romaine (voir par exemple l'*Histoire des plantes* de Théophraste, vers – 314). Au Moyen Âge, le « mal des ardents », ou ergotisme, faisait régulièrement des ravages dans les populations qui absorbaient sans le savoir des alcaloïdes produits par le champignon *Claviceps purpurea*, agent de l'ergot du seigle. Les plantes cultivées sont toutes issues de plantes sauvages et leurs bioagresseurs sont en général originaires des mêmes zones de diversité.

Au cours du processus de domestication des végétaux puis d'extension de l'agriculture, au Néolithique, les espèces cultivées ont entraîné un cortège d'agents pathogènes et de ravageurs qui ont parfois fini par se spécialiser sur les cultures (Stukenbrock *et al.*, 2007). Elles ont aussi favorisé le développement de plantes messicoles, adventices qui leur sont associées voire inféodées, comme le coquelicot. Les agriculteurs ont donc appris à vivre avec cette contrainte. Dans les systèmes agricoles traditionnels, les rendements sont bas en raison d'une faible fertilisation et de l'impact des bioagresseurs, mais les variétés possèdent un bon niveau de résistance à ces différents types de stress (Moreno, 1985) et assurent une production suffisante aux besoins alimentaires locaux malgré l'occurrence ponctuelle d'accidents, soit climatiques (par exemple la sécheresse), soit liés à des bioagresseurs.

La situation se complexifie cependant lorsque la production agricole se spécialise fortement ou s'intensifie. Les exemples les plus connus (Schumann, 1991) sont l'épidémie de mildiou de la pomme de terre en Irlande lors des années 1846-1848, la destruction du vignoble en France par le phylloxéra durant la seconde moitié du XIX^e siècle et l'épidémie d'helminthosporiose du maïs aux États-Unis en 1970-1971. Dans le premier cas, il s'agit typiquement de l'introduction d'un agent pathogène *via* du matériel végétal depuis sa zone d'origine commune avec la plante vers une zone où il n'était pas encore présent. Le deuxième cas est similaire au premier à ceci près que l'agent pathogène a été introduit à partir d'une région où les vignes étaient naturellement résistantes et où il ne posait pas de problème particulier. Dans le troisième cas, l'épidémie a été causée par un champignon endémique mais peu dommageable sur une variété dans laquelle on avait introduit sans le savoir un facteur de sensibilité qui a permis l'émergence d'une nouvelle forme très virulente de l'agent pathogène. Dans ces trois situations, les conséquences ont été très différentes, avec une famine épouvantable en Irlande, causant un million de morts, une catastrophe économique et sociale pour le monde viticole en France et un problème économique avec une perte chiffrée à plus d'un milliard de dollars aux États-Unis. La cause, en revanche, est très semblable : la culture généralisée de variétés sensibles sur des surfaces importantes, qui permet l'installation et la propagation foudroyante d'un bioagresseur introduit ou l'émergence d'une maladie jusqu'alors anodine.

Dans un milieu naturel, les plantes coexistent avec les agents pathogènes. Elles sont en général éloignées les unes des autres, séparées par des individus d'autres espèces, et leur diversité génétique est très grande. Vis-à-vis d'un agent pathogène donné, elles sont plus ou moins résistantes et la probabilité de transmission entre deux plantes qui seraient identiquement sensibles à la maladie est très faible, car la diversité des facteurs génétiques de résistance est très élevée (Lannou *et al.*, 2021). Cela favorise notamment les effets de dilution de l'inoculum (Keesing *et al.*, 2006), dont une grande partie est perdue, et conduit à des épidémies à progression lente. Mais cultiver des plantes, et ce depuis l'origine de l'agriculture il y a dix mille ans, c'est regrouper des individus de la même espèce dans une parcelle, sélectionner empiriquement les plus productifs (ou les plus adaptés aux

besoins de l'agriculteur) d'une année sur l'autre, et – quand on le peut – apporter des engrais. Regrouper, c'est favoriser les contacts et réduire les effets de dilution ; sélectionner, c'est gagner sur un ou des caractères ciblés, mais aussi perdre en diversité sur d'autres caractères (Haudry *et al.*, 2007), notamment de résistance aux maladies si on se focalise sur le nombre ou la taille des grains ; fertiliser, c'est avantager les parasites biotrophes qui se nourrissent sur les tissus vivants de leur hôte (Robert *et al.*, 2004). La conséquence est qu'une culture est par construction un milieu favorable aux maladies et aux proliférations de ravageurs. Lorsqu'il s'agit de bioagresseurs endémiques, avec lesquels l'agriculteur a appris à vivre en adaptant ses pratiques, en sélectionnant spontanément pour une bonne tolérance aux stress multiples ou en développant des systèmes de gestion des semences produisant empiriquement de la diversité (Dedeurwaerdere et Hannachi, 2019), la situation reste sous contrôle. Par contre, si un nouveau bioagresseur émerge ou est introduit dans un contexte où on ne peut pas le maîtriser faute de variétés résistantes, de moyens de lutte ou de connaissances appropriées, elle devient rapidement catastrophique, comme ce fut le cas pour le mildiou de la pomme de terre en Irlande ou le phylloxéra de la vigne en France au XIX^e siècle.

Le milieu cultivé est donc par essence propice au développement des bioagresseurs et en particulier des espèces nouvellement introduites ou émergentes, qui y rencontrent peu de résistance. La situation s'aggrave avec le processus d'intensification, et l'agriculture devient alors une véritable « fabrique des émergences » (Halkett *et al.*, 2021). L'intensification agricole, par la mécanisation (qui s'accompagne de l'agrandissement des parcelles), par la fertilisation et par la sélection de variétés à haut potentiel de rendement, a permis de nourrir la population puis de produire des excédents exportables. Il faut rappeler que cet effort a débuté après 1945 et que la France a atteint l'autonomie alimentaire dans les années 1970. Il faut également avoir en tête que l'agriculture intensive produit des excédents commerciaux bénéfiques à l'économie des pays producteurs. Mais il faut aussi savoir que son développement n'a fait qu'aggraver le risque sanitaire, pour les raisons évoquées plus haut mais ici considérablement renforcées. L'agriculture intensive, c'est un petit nombre de variétés cultivées sur des surfaces gigantesques, souvent génétiquement très proches les unes des autres, souvent sensibles aux maladies, et des plantes fertilisées à saturation. Le paysage agricole est alors extrêmement vulnérable aux épidémies et aux proliférations de ravageurs.

Ici également, les bioagresseurs « habituels » sont en général bien maîtrisés (notamment grâce aux pesticides mais aussi grâce à la résistance génétique, nous y reviendrons plus bas), mais un bioagresseur nouvellement introduit ou apparu peut faire des ravages gigantesques. L'un des premiers exemples de l'ère moderne post-intensification est celui de l'helminthosporiose du maïs aux États-Unis. On peut aussi évoquer les ravages récents dus à la bactérie *Xylella fastidiosa* dans le sud de l'Italie ou les gigantesques épidémies causées à l'échelle mondiale par une nouvelle souche de rouille noire du blé (*Puccinia graminis* Ug99, apparue en 1999), qui a pris agriculteurs et sélectionneurs au dépourvu.

Un système d'assurance qui ne tient plus

Malgré ces difficultés, la production agricole est assurée. Le processus d'intensification a permis une augmentation spectaculaire des rendements entre la fin de la Seconde Guerre mondiale et le début des années 2000. Sur cette période, le rendement moyen du blé en France a progressé de manière stable et continue, grâce aux efforts des sélectionneurs et en bénéficiant de l'évolution des pratiques et de la réorganisation des exploitations. Répondre aux besoins alimentaires de base des populations n'est plus un problème de production. La dernière famine en Occident est celle des Irlandais au milieu du XIX^e siècle, causée par *Phytophthora infestans*, et à l'échelle globale, la sécurité alimentaire est une question liée davantage aux conflits ou à l'organisation des échanges qu'à la production primaire.

Mais si les systèmes agricoles intensifs ont su compenser leur très grande vulnérabilité face aux bioagresseurs, c'est en premier lieu grâce à l'emploi massif de pesticides de synthèse, à la fois très efficaces et relativement peu coûteux pour l'agriculteur. Les insecticides sont apparus dès les années 1960 et les fongicides au cours des années 1970. Appliqués de manière préventive et systématique, ils empêchent le développement des maladies et des ravageurs et permettent de cultiver une variété à grande échelle même si elle est très sensible. Un blé nommé Soissons, sans résistance à la rouille brune mais très productif, a par exemple dominé l'assolement en France en occupant entre 10 et 40 % des surfaces semées sur la période 1991-2002. Les variétés de pommes commercialisées sont encore majoritairement sensibles à la tavelure et produites sous couverture fongicide (sans oublier les insecticides qui les protègent du carpocapse). La production viticole repose fortement sur la protection chimique contre le mildiou et l'oïdium (ou l'emploi du cuivre en agriculture biologique), les premières variétés résistantes à ces maladies n'ayant été inscrites au catalogue qu'à partir de 2018. Les pesticides ont ainsi joué un rôle d'assurance contre les bioagresseurs tout au long du processus de spécialisation et d'intensification de l'agriculture et le système de production a pu être optimisé en s'affranchissant du risque sanitaire. Une conséquence est que notre agriculture est devenue extrêmement dépendante de la protection chimique.

Les effets négatifs de l'usage des pesticides à grande échelle et de manière systématique en agriculture sont maintenant bien connus. Ceux sur les organismes non cibles, entraînant des dommages majeurs sur la biodiversité, sont bien documentés. Ceux sur la santé humaine le sont également, même si les molécules les plus toxiques ont été peu à peu retirées du marché. Pour autant, sortir d'un système qui a été mis en place et progressivement optimisé pour la productivité sous couverture pesticide pendant cinquante ans est extrêmement difficile. Les premières actions de politique publique ambitieuses sur le sujet ont été initiées en 2008, avec la mise en place du plan Écophyto à l'échelle nationale et la promulgation de la directive européenne 2009/128/CE qui incite les États au développement de pratiques alternatives à la protection chimique. Mais sur le terrain, il est difficile de se passer d'un produit très efficace et peu cher, qui règle de manière simple et directe le problème (le coût environnemental des pesticides de synthèse est en fait

très élevé, mais personne ne le paye directement). Il n'est donc pas étonnant de constater que les politiques d'incitation à réduire l'usage des pesticides chimiques sont clairement moins efficaces qu'initialement espéré et que des approches plus coercitives se mettent en place. La directive 2009/128/CE devrait ainsi se transformer en règlement, et surtout un nombre important de molécules sont peu à peu retirées du marché (règlement CE 1107/2009). Un exemple bien connu est celui des insecticides néonicotinoïdes dont on s'est rendu compte à partir de 2012 qu'ils avaient des effets sublétaux sur les abeilles, mais l'ampleur des retraits est bien plus vaste, et on considère que 75 % des matières actives existantes pour la protection des cultures ne seront plus homologuées à terme.

Se passer des pesticides chimiques en agriculture n'est donc pas facile. La construction de systèmes de production alternatifs est certainement possible et des approches sont disponibles pour cela (Fauvergue *et al.*, 2020 ; Lannou *et al.*, 2021). Elles permettront – et dans certains cas, permettent déjà – de s'affranchir de ces produits dans un contexte de production normal, c'est-à-dire en présence de bioagresseurs endémiques bien connus. Mais qu'en est-il vis-à-vis des espèces introduites ou émergentes ? Dans les procédures officielles, la première action à mettre en œuvre en cas de présence sur le territoire d'une espèce réglementée est son éradication (chapitre 16). Outre la destruction physique de végétaux, cela implique généralement l'usage de pesticides chimiques, comme ce fut le cas lors des détections de *Xylella fastidiosa* sur le territoire européen. Parfois, l'éradication fonctionne (voir l'exemple de *Xanthomonas citri* pv. *citri* en Australie : chapitre 17), mais bien souvent elle échoue (chapitre 14). Pour autant, des processus de lutte obligatoire se mettent en place pour contenir le bioagresseur, et là aussi ils reposent souvent sur l'usage de pesticides, comme cela est régulièrement pratiqué contre le vecteur de la flavescence dorée de la vigne dans certaines régions viticoles. Bien sûr, les approches de prophylaxie jouent également un rôle de premier plan, mais est-il possible d'envisager une éradication sans utiliser de pesticides de synthèse ? Il existe des cas d'éradication réussie d'une espèce envahissante par des approches de lutte biologique (Borowiec et Sforza, 2020) ; cela est cependant plus réaliste dans un milieu naturel que dans les territoires agricoles dont on a vu qu'ils sont particulièrement vulnérables aux épidémies et aux proliférations de ravageurs.

La question se pose donc de savoir s'il sera possible à terme de lutter contre des bioagresseurs émergents ou introduits sur le territoire sans avoir accès à des pesticides efficaces. Il est possible que ces molécules deviennent un jour des produits stratégiques, utilisés en cas de crise sanitaire et faisant l'objet d'un stockage préventif. Cela suppose que des industriels continuent à les développer et à les produire et que l'on accepte de les utiliser dans un contexte de lutte réglementaire (ce qui n'est pas le cas par exemple pour certains viticulteurs face à la flavescence dorée). Pour autant, ramener la question à la disponibilité de produits chimiques efficaces serait extrêmement réducteur. Comme dit plus haut, ces produits peuvent s'avérer utiles, voire indispensables dans certains cas, mais d'une part, ils posent de sérieux problèmes sur les organismes non cibles,

et d'autre part, la question de fond est bien celle de la vulnérabilité intrinsèque des territoires agricoles vis-à-vis des épidémies et des invasions de bioagresseurs. Pour éviter des catastrophes récurrentes tout en réduisant autant que possible le recours aux pesticides chimiques, il est possible de travailler dans deux directions complémentaires : s'organiser face au risque sanitaire et anticiper les crises ; réduire la vulnérabilité intrinsèque des systèmes agricoles.

Réduire la vulnérabilité sanitaire des territoires agricoles

La protection des cultures est une question qui se raisonne classiquement à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation, unités de gestion pour l'agriculteur. Les épidémies, par contre, se propagent à l'échelle de territoires bien plus vastes. Hormis le cas des espèces inféodées au sol et peu mobiles, de nombreux bioagresseurs se dispersent facilement d'une région à l'autre. Lorsque le paysage agricole est génétiquement très homogène, occupé par deux ou trois espèces largement majoritaires et un petit nombre de variétés par espèce, il n'existe pas de frein à leur propagation. Par ailleurs, certains agents pathogènes et ravageurs effectuent une partie de leur cycle biologique hors des cultures ou sont également présents sur des plantes non cultivées, constituant des réservoirs (chapitres 11, 14 et 18). Réduire la vulnérabilité des territoires agricoles vis-à-vis de la propagation des bioagresseurs aurait bien sûr une grande vertu pour limiter l'impact des espèces endémiques (Lannou *et al.*, 2021), mais c'est également une voie essentielle pour atténuer voire éviter les crises sanitaires. On peut aller plus loin en disant que réduire cette vulnérabilité est indispensable si l'on veut développer une agriculture à la fois moins dépendante des pesticides et moins sujette aux crises sanitaires à répétition.

Il existe des exemples pour étayer cette idée. Un des plus connus est celui de la rouille noire du blé aux États-Unis, dont les épidémies dévastatrices ont été régulées en supprimant une plante sauvage réservoir de la maladie, l'épine-vinette, dans les zones de production agricole (Roelfs, 1982). On peut également mentionner que l'épidémie d'helminthosporiose du maïs dans le même pays, en 1970, a provoqué une réflexion sur le danger des paysages agricoles génétiquement homogènes et sur la nécessité d'assurer une diversité de génotypes suffisante à l'échelle des zones de production (Bruns, 2017)... mais il semble que cela en soit resté au niveau de la réflexion post-crise. Un autre exemple, décrit au chapitre 18, est la gestion collective de la flavescence dorée par la suppression des vignes ensauvagées qui constituent des réservoirs de la maladie. Au-delà de ces illustrations, nous manquons d'un cadre général d'application pour travailler de manière systémique sur la vulnérabilité des territoires agricoles. Des modèles et des résultats expérimentaux sont disponibles en épidémiologie (Lannou *et al.*, 2021) ou en biologie des populations (par exemple Beaumelle *et al.*, 2021) ; néanmoins, une question aussi complexe relève d'une démarche interdisciplinaire associant des travaux en biologie et en sciences sociales, notamment sur le comportement des acteurs, les

contraintes économique et d'organisation (chapitre 15) et les politiques publiques (chapitre 18). La notion de socio-pathosystème telle que proposée par Charrier et Barbier (2021) est une étape dans cette voie.

S'organiser face aux crises sanitaires

Les systèmes de surveillance des organismes biologiques introduits sont organisés par les États et représentent un effort de coordination remarquable. La genèse de ces systèmes de contrôle et d'alerte et leur mode de fonctionnement actuel sont décrits en détail dans les chapitres 16 et 17. Ils sont plus ou moins performants selon les régions du monde et les moyens économiques et techniques dont disposent les pays, mais ils font l'objet d'un travail considérable de coordination internationale *via* des structures comme l'Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes (OEPP) et plus généralement dans le cadre de la Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV ; chapitres 16 et 19). Il est très difficile de juger de leur performance effective car il faudrait pour cela un bilan complet des crises sanitaires empêchées ou retardées, avec une évaluation des pertes évitées, ce qui n'est pas réalisable. En quelque sorte, on ne perçoit ici que les échecs, c'est-à-dire les crises qui ont eu lieu. Il est pourtant certain que de nombreuses introductions de bioagresseurs ont été évitées grâce aux efforts de contrôle des États et de leurs agences dédiées (chapitres 1, 9, 10 et 16).

Pour autant, ces systèmes sont lourds et relativement peu réactifs, donnant parfois l'impression de « courir derrière la crise » qui se développe inexorablement. Étant confrontés à des enjeux économiques d'importance, ils ne peuvent se permettre de conduire à des décisions trop rapides ou sujettes à critique. La présence d'un agent pathogène réglementé sur une culture dans une région donnée peut en effet empêcher les exportations vers des pays tiers ou conduire à des actions de lutte extrêmement coûteuses pour les producteurs, telles que des arrachages d'arbres (en arboriculture). Le diagnostic préalable à la décision doit donc être particulièrement fiable et par conséquent, fondé sur des méthodes certifiées et si possible partagées par les pays d'une même zone, comme c'est le cas au sein de l'Union européenne. Cela suppose bien sûr une parfaite connaissance de la systématique des organismes concernés, et comme rappelé au chapitre 6, des efforts en ce sens restent indispensables.

Une voie essentielle d'amélioration des performances est de renforcer les capacités de détection par des échanges sur les méthodologies entre les acteurs de la recherche et les agences en charge de la surveillance sanitaire du territoire. Les outils de détection basés sur l'analyse des génomes sont en constante évolution et les laboratoires mettent au point des méthodes de plus en plus sensibles et de plus en plus rapides, capables de repérer la présence d'un petit nombre de bactéries dans un échantillon végétal. Le chapitre 7 décrit l'évolution des outils moléculaires permettant la détection et l'identification d'une espèce et le chapitre 14 détaille leur utilisation vis-à-vis de *Xylella fastidiosa*. Le débat est

permanent entre la robustesse nécessaire des outils officiels, très fiables mais souvent moins performants, et les outils de dernière génération développés en recherche, d'une capacité de résolution impressionnante mais dont les résultats peuvent être plus difficiles à interpréter hors du cadre scientifique. La recherche se situe par définition dans l'exploratoire, avec les risques assumés que cela comporte et qui sont nécessaires au progrès, tandis que la surveillance cherche à éviter tout risque d'erreur, notamment les faux positifs¹. Le dialogue entre ces deux mondes est donc complexe mais absolument nécessaire au progrès méthodologique en matière de surveillance biologique.

Une autre source de progrès, essentielle, réside dans la collecte, la gestion et l'analyse des données épidémiologiques. Déterminer la meilleure manière d'échantillonner pour maximiser la probabilité de détection précoce d'un organisme introduit (y compris en mobilisant des dispositifs originaux comme la collecte de données issues du grand public : voir le chapitre 10), en tenant compte de la répartition des végétaux sur le territoire mais aussi des flux entrants et sortants, des lieux de concentration et de traitement des produits récoltés... est un défi statistique et organisationnel majeur. De même, les choix qui seront faits pour tenter d'éradiquer ou pour enrayer la progression de l'organisme invasif sont complexes et dépendent de considérations biologiques (les modes de survie, de dispersion...) mais aussi économiques, car la surveillance a un coût qui doit être raisonné en fonction du risque (chapitres 11, 12, 13 et 15). Ici également, le rapprochement entre les acteurs de la recherche et les services de surveillance et de gestion des crises est essentiel. Le chapitre 17 décrit l'organisation de la Plateforme d'Épidémiosurveillance en Santé végétale, une structure mixte entre recherche et services sanitaires de l'État qui a été mise en place suite à la crise causée en 2015 par *Xylella fastidiosa* et qui permet maintenant de développer des méthodes innovantes et très performantes pour la veille sanitaire, pour le recueil et l'analyse des données épidémiologiques et pour la prévision des risques.

Des progrès techniques et organisationnels ont donc été accomplis et d'autres sont à venir, mais il reste une faiblesse majeure des systèmes de gestion des crises sanitaires : leur capacité d'anticipation. Ces systèmes travaillent globalement selon deux axes : la surveillance du territoire (des entrées, des sorties, des zones de production) et la gestion des crises en cours (mise en place de procédures d'éradication puis d'enrayement). Par contre, l'anticipation de la crise probable est un angle mort des politiques publiques en matière sanitaire. On sait que certains bioagresseurs nous menacent directement : le nématode du pin est officiellement présent au Portugal et pourrait causer une crise majeure s'il arrivait dans les Landes ; *Spodoptera frugiperda* est un ravageur du maïs et d'autres cultures qui se répand à l'échelle mondiale et remonte actuellement l'Afrique vers l'Europe ; une sous-espèce de *Xylella fastidiosa* adaptée à la vigne a été officiellement détectée aux Baléares... Si les bioagresseurs potentiellement invasifs sont nombreux, certains sont à redouter

¹ Un faux positif consiste ici à dire qu'un bioagresseur est présent alors qu'il ne l'est pas.